

鉛直アレー観測記録を用いた地盤のS波速度およびQ値の 同定精度に関する一考察

A Remark on Accuracy in Identification of Shear Wave Velocity and
Quality Factor of Subsurface Ground using Vertical Array Records

辻原 治*・沢田 勉**

Osamu TSUJIHARA and Tsutomu SAWADA

*博士 (工学), 和歌山工業高等専門学校助教授, 環境都市工学科(〒644-0023

和歌山県御坊市名田町野島 77)

**工博, 徳島大学教授, 工学部建設工学科(〒770-8506 徳島市南常三島町 2-1)

This paper describes the reliability of dynamic soil properties such as shear wave velocity and quality factor of subsurface layers that have been identified by using vertical array records of earthquake ground motions. It is assumed that horizontally layered ground is excited by vertically incident shear wave. Propagation law of errors is applied to estimate the variance of unknown properties. It is shown that the reliability of estimated properties could be evaluated in numerical analysis.

Key Words : Dynamic Soil Properties, Identification, Reliability

1. はじめに

地表の地震動は、比較的軟弱な表層地盤による増幅の影響を大きく受ける。したがって、表層地盤の動的特性を推定することは、構造物の耐震設計において、また、震害予測の観点からみてきわめて重要である。

近年、地震計の普及により、地盤震動の鉛直アレー観測記録を用いた地盤構造の同定が多く行われるようになった(たとえば1)~7)。

この種の研究では、一般に、地盤震動記録のスペクトル比とその計算値の残差を目的関数とし、これを最小化するべく地盤のS波速度および減衰が同定される。しかし、同定された未知パラメータの信頼性にまで言及した研究は少ない。辻原ら⁸⁾は、水平成層地盤の弾性波速度、減衰の同定問題において、観測ノイズが同定の精度に及ぼす影響を検討している。栗田ら⁹⁾は、観測記録にノイズが含まれる場合の未知パラメータの推定値を、観測ノイズの未知パラメータに対する感度解析によって、直接求める方法を提示している。こ

の方法は、ノイズを既知量として定式化しているため、実地盤の同定結果から未知変数の推定精度を評価するものではない。

本研究は、未知のノイズを含む鉛直アレー観測記録を用いた水平成層地盤の同定問題において、推定された未知パラメータの信頼性を同定結果から評価する方法を定式化し、数値計算によりその妥当性を検討する。

2. 同定問題の定式化

図-1に示すような水平成層構造をもつ地盤に鉛直下方からSH波が入射するものと仮定し、地表または地中で得られた鉛直アレー観測記録より、地盤各層のS波速度 V_m とQ値 Q_m を同定する問題を考える。なお、地盤各層の層厚 H_m および土の密度 ρ_m は既知とし、Q値は周波数によらず一定と仮定する。

いま、第 p 層内の点 p および第 q 層内の点 q ($p < q$)で、地盤震動加速度の同時観測記録が得られているものとする。これらの記録のフーリ

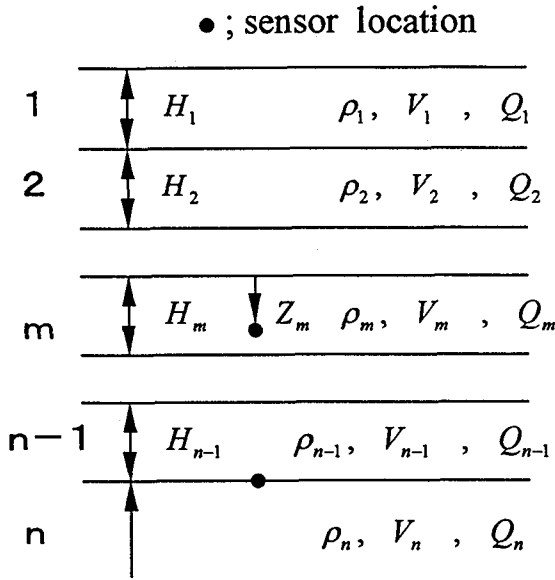


図-1 水平成層地盤モデル

エスペクトルをそれぞれ $X_p(f)$, $X_q(f)$ とする。鉛直下方から入射した振動数 f の SH 波の重複反射を仮定すると、それらと地表面加速度のフーリエ振幅 $X_0(f)$ との間にはつぎの関係が成り立つ¹⁰⁾。

$$X_p(f) = \gamma_p(f; \alpha) X_0(f) \quad (1)$$

$$X_q(f) = \gamma_q(f; \alpha) X_0(f) \quad (2)$$

ここに、 $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_N)$ は同定すべき未知パラメータ V_j , Q_j , $j = 1, 2, \dots, q$ を一般的に表したものである。また、 $\gamma_p(f; \alpha)$, $\gamma_q(f; \alpha)$ は地表面に対する加速度スペクトル振幅の低減率であり、つぎに示す 2×2 行列 $[R_p]$, $[R_q]$ の第 1 行第 1 列の係数である。

$$[R_p] = [T_p][S_{p-1}][S_{p-2}] \cdots [S_1] \quad (3)$$

$$[R_q] = [T_q][S_{q-1}][S_{q-2}] \cdots [S_1] \quad (4)$$

上式に含まれる行列 $[S_m]$ は、第 m 層において上下の境界面の加速度およびひずみの関係を表す 2 行 2 列の行列で、その係数は次式で与えられる。

$$\begin{cases} S_{m-11} = [\exp(i a_m \omega) + \exp(-i a_m \omega)] / 2 \\ S_{m-12} = [\exp(i a_m \omega) - \exp(-i a_m \omega)] / (2 i b_m \omega) \\ S_{m-21} = i b_m \omega [\exp(i a_m \omega) - \exp(-i a_m \omega)] / 2 \\ S_{m-22} = S_{m-11} \end{cases} \quad (5)$$

ここに、 $\omega (= 2\pi f)$ は円振動数、 $i (= \sqrt{-1})$ は虚数単位であり、 a_m , b_m は次式で表される。

$$a_m = H_m / (V_m \sqrt{1 + i/Q_m}) \quad (6)$$

$$b_m = \rho_m V_m \sqrt{1 + i/Q_m} \quad (7)$$

式(3), (4)の右辺第一項の $[T_m]$ ($m = p$ または $m = q$) は、式(5)で定義される行列 $[S_m]$ において、 H_m の代わりに、第 m 層の上面に座標軸の原点を定めた層内任意点の鉛直座標 Z_m を代入したものである。 $Z_m = 0$ の場合には、 $[T_m] = [I]$ 、すなわち $[T_m]$ は単位行列となる。

さて、 α は一般に未知であるから、式(1), (2)は近似的にしか成立しない。そこで、未知パラメータベクトル α を推定する問題を、つぎの目的関数を最小化する最適化問題として表す。

$$S(\alpha) = \sum_{j=1}^{N_f} \{U_{pq}(f_j; \alpha) - U_{pq}(f_j)\}^2 \rightarrow \min \quad (8)$$

ここに、 f_j は対象とする振動数帯を分割したときの j 番目の振動数点であり、 N_f はそれらの振動数点の総数である。また、 $U_{pq}(f_j; \alpha)$ および $U_{pq}(f_j)$ は次式で与えられる。

$$U_{pq}(f_j; \alpha) = |\gamma_p(f_j; \alpha) / \gamma_q(f_j; \alpha)| \quad (9)$$

$$U_{pq}(f_j) = |X_p(f_j) / X_q(f_j)| \quad (10)$$

式(9)における $\gamma_p(f_j; \alpha) / \gamma_q(f_j; \alpha)$ は一種の周波数応答関数である。式(8)の目的関数は、観測記録から推定された周波数応答関数の振幅とその理論値との残差平方和として表されている。また、地中あるいは地表の 3 点以上で鉛直アレー観測記録が得られている場合には、それらを同時に取り込んだ目的関数を用いることもできる。たとえば、 p , q および r の 3 点 ($p < q < r$) で地盤震動記録が得られている場合には、次式の目的関数を用いられる。

$$S(\alpha) = \sum_{k=p,q} \sum_{j=1}^{N_f} \{U_{kr}(f_j; \alpha) - U_{kr}(f_j)\}^2 \rightarrow \min \quad \cdots (11)$$

このように、式(8)または(11)を最小化することによって、最も深い位置にある観測点から地表までの地盤各層のS波速度およびQ値を推定することができる。

3. 同定結果の精度評価

式(8)の $U_{pq}(f_j)$ を観測値と見なし、未知パラメータベクトル α の推定値 α_e の精度を標準偏差で評価することとする。以下にこれを誘導する。

未知パラメータベクトルの推定値 α_e が次式で得られたとする。

$$\alpha_e = \alpha_0 + \hat{\alpha} \quad (12)$$

α_0 は α の近似値であり、 $\hat{\alpha}$ は補正量を表す。最小二乗法によれば¹¹⁾、 $\hat{\alpha}$ は次式で表される。

$$\hat{\alpha} = -(A^T A)^{-1} A^T L \quad (13)$$

ここに、 A は周波数応答関数の微係数行列である。 L は残差ベクトルであり、それらは次式で表される。なお、 T は転置を表す。

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1N} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{N_f 1} & a_{N_f 2} & \cdots & a_{N_f N} \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$L = \{l_1, l_2, \dots, l_{N_f}\}^T \quad (15)$$

上式において、 a_{jk} および l_j はそれぞれ以下のよう表される。

$$a_{jk} = \partial U_{pq}(f_j; \alpha_e) / \partial \alpha_k \quad (16)$$

$$l_j = U_{pq}(f_j; \alpha_e) - U_{pq}(f_j) \quad (17)$$

観測値 $U_{pq}(f_j)$, $j=1, 2, \dots, N_f$ に誤差 ε が含まれているものとし、 ε は偶然誤差で相関がなく、次式で表されるものとする。

$$\varepsilon = \{\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_{N_f}\}^T \quad (18)$$

$$E\{\varepsilon_i\} = 0 \quad (i=1, 2, \dots, N_f) \quad (19)$$

$$E\{\varepsilon_i \varepsilon_j\} = \begin{cases} \sigma^2 & (i=j) \\ 0 & (i \neq j) \end{cases} \quad (20)$$

$\hat{\alpha}$ の誤差を $\varepsilon_\alpha (= \{\varepsilon_{\alpha 1}, \varepsilon_{\alpha 2}, \dots, \varepsilon_{\alpha N}\}^T)$ とすると、式(13)より次式が得られる。

$$\varepsilon_\alpha = -(A^T A)^{-1} A^T \varepsilon \quad (21)$$

上式の転置 ε_α^T をとり、 ε_α との積を求めると次式が得られる。

$$\varepsilon_\alpha \varepsilon_\alpha^T = (A^T A)^{-1} A^T \varepsilon \varepsilon^T A (A^T A)^{-1} \quad (22)$$

式(20)より $E\{\varepsilon \varepsilon^T\} = \sigma^2 I$ の関係を用い、上式の両辺の期待値をとると次式が得られる。

$$\begin{aligned} E\{\varepsilon_\alpha \varepsilon_\alpha^T\} &= (A^T A)^{-1} A^T E\{\varepsilon \varepsilon^T\} A (A^T A)^{-1} \\ &= \sigma^2 (A^T A)^{-1} A^T A (A^T A)^{-1} \\ &= \sigma^2 (A^T A)^{-1} \end{aligned} \quad \cdots(23)$$

ここに、 σ^2 は観測誤差の分散であり、その不偏推定量 m_0^2 は次式で表される¹¹⁾。

$$m_0^2 = \frac{\sum_{j=1}^{N_f} \{U_{pq}(f_j; \alpha_e) - U_{pq}(f_j)\}^2}{N_f - N} \quad (24)$$

上式の N は未知変数の総数である。

また、式(23)の左辺はつぎのように記述できる。

$$\begin{aligned} E\{\varepsilon_\alpha \varepsilon_\alpha^T\} &= \begin{bmatrix} E\{\varepsilon_{\alpha 1}^2\} & E\{\varepsilon_{\alpha 1} \varepsilon_{\alpha 2}\} & \cdots & E\{\varepsilon_{\alpha 1} \varepsilon_{\alpha N}\} \\ E\{\varepsilon_{\alpha 2} \varepsilon_{\alpha 1}\} & E\{\varepsilon_{\alpha 2}^2\} & \cdots & E\{\varepsilon_{\alpha 2} \varepsilon_{\alpha N}\} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ E\{\varepsilon_{\alpha N} \varepsilon_{\alpha 1}\} & E\{\varepsilon_{\alpha N} \varepsilon_{\alpha 2}\} & \cdots & E\{\varepsilon_{\alpha N} \varepsilon_{\alpha N}\} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \sigma_{\alpha 1}^2 & \sigma_{\alpha 1 \alpha 2} & \cdots & \sigma_{\alpha 1 \alpha N} \\ \sigma_{\alpha 2 \alpha 1} & \sigma_{\alpha 2}^2 & \cdots & \sigma_{\alpha 2 \alpha N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sigma_{\alpha N \alpha 1} & \sigma_{\alpha N \alpha 2} & \cdots & \sigma_{\alpha N}^2 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad \cdots(25)$$

ここに、 $\sigma_{\alpha i}^2$ は未知パラメータ α_i の分散であり、 $\sigma_{\alpha i \alpha j}$ は α_i , α_j の共分散である。

以上より、未知パラメータ α_i の標準偏差は次式で推定される。

$$\sigma_{\alpha} = m_0 \sqrt{(\mathbf{A}^T \mathbf{A})_{ii}^{-1}} \quad (26)$$

上式の、 $(\mathbf{A}^T \mathbf{A})_{ii}^{-1}$ は $(\mathbf{A}^T \mathbf{A})$ の逆行列における第 i 行第 i 列の係数を表す。

なお、式(16)の偏導関数は付録に記す。

4. 数値計算結果および考察

モンテカルロシミュレーションによって、未知パラメータに対する精度評価法の妥当性を検討する。図-2に示すモデル地盤を対象として、G.L.-20m と地表の地盤震動加速度を用いることとした。

まず、観測記録に代わる波形の作成方法について述べる。G.L.-20m における地盤震動加速度を有帯域ホワイトノイズ（帯域幅 0.1~10Hz, 最大振幅 50gal）として作成する。重複反射理論を適用し、地表での加速度を計算する。そして、1000 組の異なる有帯域ホワイトノイズ（帯域幅 0.1~10.0Hz, 最大加速度 10gal）を作成し、観

測ノイズとして、それぞれ地表面加速度に加える。模擬観測波の一例を図-3に示す。図の下側に G.L.-20m, 上側に地表の加速度を示す。このようにして作成した 1000 組の模擬観測記録を用いて同定の計算を行った。

つぎに、計算結果について述べる。同定に際しては、層厚および密度を既知として、各層の S 波速度および Q 値を推定することとした。S 波速度および Q 値の初期値は、すべて真値に対して 1.05 倍の値を与える。また、式(8)の目的関数の最小化には非線形最適化手法として改良 SLP 法¹²⁾を用いることとした。図-4は解析結果の一例であり、S 波速度および Q 値の収束状況を示す。それぞれ、横軸が改良 SLP 法による反復計算回数であり、縦軸は各パラメータの値である。点線は真値を表す。反復計算回数の上限を 50 回としたが、すべてのパラメータが収束していることがわかる。表-1に未知パラメータの真値と収束値を示す。図-5では、式(10)で得られる模擬観測記録のスペクトル比と、式(9)で計算した未知パラメータの初期値および収束値に対する周波数応答関数を比較している。収束値に対する周波数応答関数は、模擬観測記録のスペクトル比によく対応していることがわかる。図-6に、両者の残差

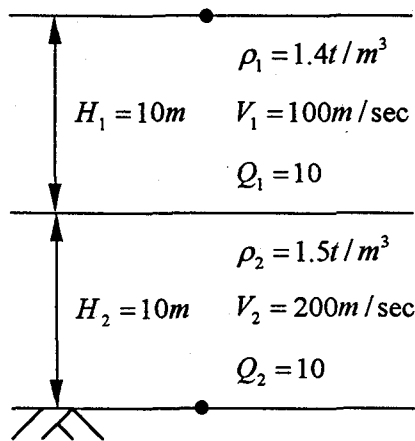


図-2 解析モデル

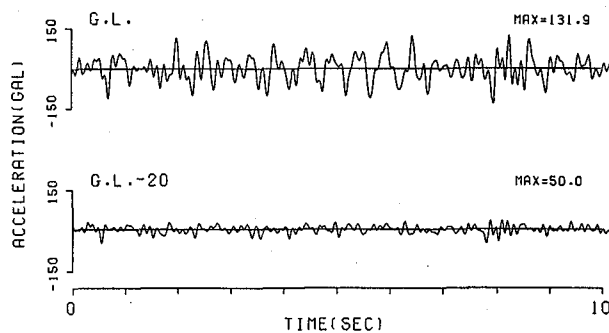


図-3 模擬観測記録の一例

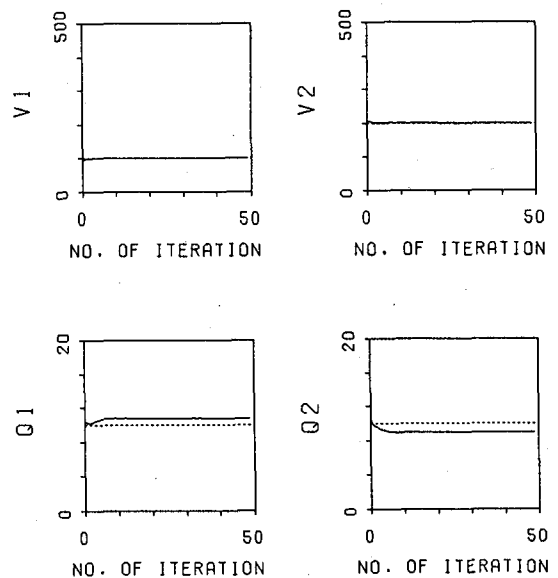


図-4 未知パラメータの収束状況

表-1 未知パラメータの真値と初期値

未知パラメータ	真 値	収束値
V_1	100.0	99.80
V_2	200.0	200.00
Q_1	10.0	10.74
Q_2	10.0	9.00

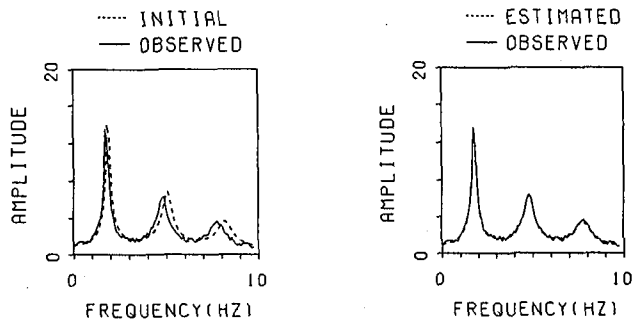


図-5 模擬観測記録のスペクトル比と地盤モデルの周波数応答関数

表-2 未知パラメータの推定値の標準偏差と変動係数

未知パラメータ	標準偏差	変動係数
V_1	0.269	0.00270
V_2	0.724	0.00362
Q_1	0.398	0.03706
Q_2	0.390	0.04333

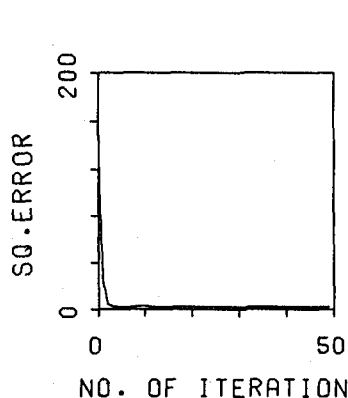
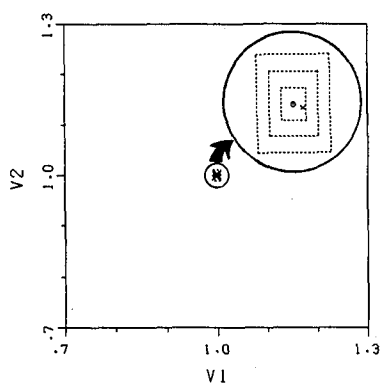
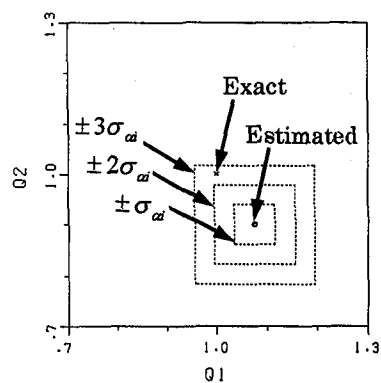


図-6 目的関数の変化



(a) V_1-V_2



(b) Q_1-Q_2

図-7 真値で基準化した未知パラメータの推定値と標準偏差

平方和, すなわち式(8)の目的関数の変化を示す。また表-2に, 式(26)で計算された未知パラメータの推定値に対する標準偏差を示す。図-7は, それを図化したものであり, (a)は V_1 および V_2 の推定値と, それらの値に標準偏差の倍数 $\pm\sigma_{ai}$, $\pm2\sigma_{ai}$, $\pm3\sigma_{ai}$ を加えた範囲を, それぞれの真値で基準化して示している。図の(b)は, 同様に Q_1 および Q_2 について示したものである。図より, S波速度については, 観測ノイズの影響をあまり受けることなく, 精度の高い推定値が得られていることがわかる。この例では, 未知パラメータの真値が, S波速度については標準偏差内に存在し, Q値については Q_1 および Q_2 がそれぞれ $\pm2\sigma_{ai}$, $\pm3\sigma_{ai}$ 内に存在する。

このようにして得られた1000組の同定結果を図-8に示す。図は, S波速度およびQ値の収束値を, それぞれの真値で基準化してプロットしたものである。横縦の軸は, それぞれ (V_1, V_2) , (Q_1, Q_2) , (V_1, Q_1) および (V_2, Q_2) である。1000組の各解析ケースにおいて, 式(26)の標準偏差 σ_{ai} を計算し, 未知パラメータの推定値の $\pm\sigma_{ai}$, $\pm2\sigma_{ai}$, $\pm3\sigma_{ai}$ の範囲内にそれぞれの真値が存在するか否かをチェックし集計した。その結果を表-3に示す。たとえば, 第1層目のS波速度 V_1

についてみれば, $\pm\sigma_{ai}$, $\pm2\sigma_{ai}$, $\pm3\sigma_{ai}$ の範囲内に真値が存在したケースが, それぞれ679, 948, 996であり, 確率で表せば, 0.679, 0.948, 0.996となる。これらの数値は, 標準正規分布において $\pm\sigma$, $\pm2\sigma$, $\pm3\sigma$ で囲まれる領域の面積0.683, 0.954, 0.997とよく対応している。このことから判断すると, 式(26)で計算される標準偏差 σ_{ai} 内に約70%の確率で真値が存在するといった意味において, σ_{ai} は正規分布の標準偏差と同等の扱いができる。すなわち, 未知パラメータの推定誤差は, 約70%の確率で式(26)で得られる数値内で収まるということになる。

また表-4には, 各未知パラメータの推定値および標準偏差の平均と変動係数を示す。表より, Q値の変動係数は, S波速度のその10~20倍程度になっており, 減衰パラメータ推定の難しさを表している。

ところで, 未知パラメータの推定誤差 ε_{ai} (推定値と真値との残差)の分布はどのようなものなのか。このことは, 式(26)で計算される標準偏差 σ_{ai} がもつ意味を明確にするうえで重要である。図-9は, 1000組の解析ケースにおいて, それぞれ $\varepsilon_{ai}/\sigma_{ai}$ を計算し, その頻度分布を求めたものである。比較のために, 標準正規分布の理論度

数も曲線で示す。図より、頻度分布は正規分布にあてはまりそうであるが、 χ^2 分布により、その適合度の検定を行った。表-5に χ^2_0 値を示す。

$\chi^2_{0.01,20}=37.57$ であり、すべての未知パラメータについて $\chi^2_0 < \chi^2_{0.01,20}$ となり、有意水準1%で頻度分布は正規分布とみなすことができる。

表-3 未知パラメータの標準偏差の倍数内に真値が存在した解析ケース数

未知パラメータ	推定値+標準偏差の倍数		
	$\pm \sigma_{ei}$	$\pm 2\sigma_{ei}$	$\pm 3\sigma_{ei}$
V_1	679	948	996
V_2	671	946	996
Q_1	694	944	998
Q_2	702	953	991

表-4 未知パラメータの標準偏差および変動係数の平均値

未知パラメータ	推定値の平均 ($\bar{\alpha}$)	標準偏差の平均 ($\bar{\sigma}$)	変動係数 ($\bar{\sigma}/\bar{\alpha}$)
V_1	99.98	0.279	0.00279
V_2	200.05	0.728	0.00364
Q_1	10.04	0.362	0.03606
Q_2	9.98	0.488	0.04890

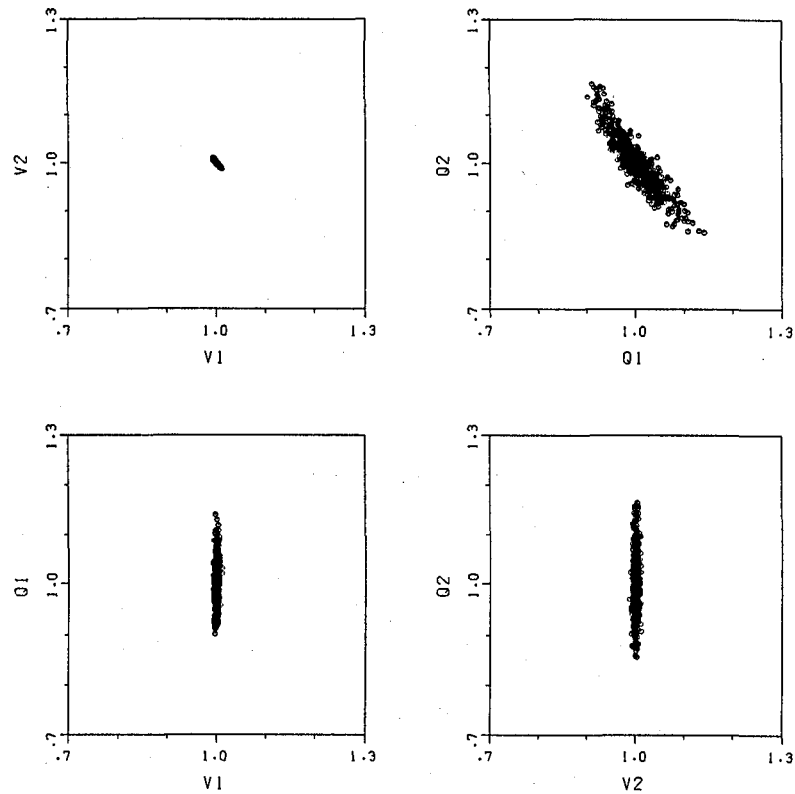


図-8 真値で基準化した1000組の未知パラメータの推定値

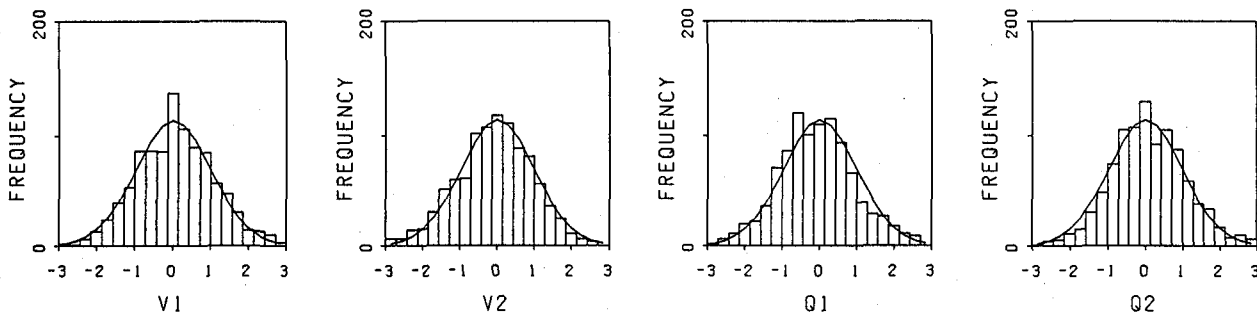


図-9 未知パラメータの推定値の標準偏差で基準化した推定誤差の頻度分布

表-5 未知パラメータの推定値の頻度分布を正規分布と仮定した場合の χ_0^2 値

未知パラメータ	χ_0^2 値
V_1	27.87
V_2	28.52
Q_1	36.20
Q_2	35.72

以上のように、未知パラメータの推定誤差が式(26)の σ_{ai} で評価できることを数値計算で示し、 σ_{ai} のもつ意味を明確にした。

5. まとめ

未知のノイズを含む鉛直アレー観測記録を用いた水平成層地盤における各層のS波速度およびQ値を同定する問題において、同定結果の信頼性を評価する方法を定式化し、数値計算によりその妥当性を検討した。

以下に得られた結果を要約する。

- 1) 地盤震動の鉛直アレー観測記録のスペクトル比とその計算値との残差を観測誤差と考え、未知パラメータの推定値に対する標準偏差を導いた。
- 2) モデル地盤について 1000 組のホワイトノイズを含む模擬観測記録を作成し、それらを用いた地盤同定のシミュレーションを行った。その結果を整理し、本研究で示した未知パラメータの推定精度評価法が妥当であることを示した。
- 3) 本研究で用いた地盤モデルにおいて、Q値の変動係数がS波速度のその 10~20 倍程度となり、剛性パラメータに比較して減衰パラメータの同定の難しさを定量的に評価する結果が得られた。

本論文では、提示した同定精度評価手法の検証に主眼を置いており、同定の際、未知パラメータの発散を防ぐために、限定されたノイズレベル(最大加速度比で8%程度)で数値計算を行ったが、ノイズレベルに対する適用限界について今後明らかにしたい。

付録

式(16)の偏導関数を以下に誘導する。

式(16) $U_{pq}(f_j; \alpha)$ は式(9)で表される。式(9)の $\gamma_p(f_j; \alpha)$ 、 $\gamma_q(f_j; \alpha)$ は複素数であり、次式で表す。

$$\begin{cases} \gamma_p(f_j; \alpha) = \phi_p + i\varphi_p \\ \gamma_q(f_j; \alpha) = \phi_q + i\varphi_q \end{cases} \quad (A-1)$$

ここに、 ϕ_p 、 φ_p 、 ϕ_q 、 φ_q は $\gamma_p(f_j; \alpha)$ 、 $\gamma_q(f_j; \alpha)$ の実数部と虚数部であり、 i は虚数単位である。式(9)を α_k について偏微分すると次式が得られる。

$$\frac{\partial U_{pq}(f_j; \alpha)}{\partial \alpha_k} = D_1(D_2 - D_3)D_4 \quad (A-2)$$

ここに、 $D_1 \sim D_4$ はつぎのようになる。

$$\begin{cases} D_1 = \left(\frac{\phi_p^2 + \varphi_p^2}{\phi_q^2 + \varphi_q^2} \right)^{-\frac{1}{2}} \\ D_2 = \left(\phi_p \frac{\partial \phi_p}{\partial \alpha_k} + \varphi_p \frac{\partial \varphi_p}{\partial \alpha_k} \right) (\phi_q^2 + \varphi_q^2) \\ D_3 = (\phi_p^2 + \varphi_p^2) \left(\phi_q \frac{\partial \phi_q}{\partial \alpha_k} + \varphi_q \frac{\partial \varphi_q}{\partial \alpha_k} \right) \\ D_4 = (\phi_q^2 + \varphi_q^2)^{-2} \end{cases} \quad (A-3)$$

参考文献

- 1) 太田裕：地震工学への最適化手法の適用-1. 八戸港 SMAC 設置点の地下構造推定, 日本建築学会論文報告集, 第 229 号, pp.35-41, 1975.
- 2) TSUJIHARA, O. and SAWADA, T. : A Localized Identification of Dynamic Soil Properties of Subsurface Layers in Ground by Vertical Array Records, Proc. of 11 W.C.E.E, in CD-ROM, 1998.
- 3) 佐藤智美, 川瀬博, 佐藤俊明：ボアホール観測記録を用いた表層地盤同定手法による工学的基盤波の推定及びその統計的特性, 日本建築学会構造系論文集, 第 461 号, pp.19-28, 1994.
- 4) 服部哲, 西川啓二, 沢田勉, 平尾潔：鉛直アレー観測記録により同定したQ値の周波数依存性に関する一考察, 第 24 回地震工学研究発表会講演論文集, pp109-112, 1997.
- 5) 鬼丸貞友, 吉澤睦博, 杉本三千雄, 本城勇介：地震アレー観測記録に基づく動的地盤定数の拡張ベイズ法による逆解析, 第 24 回地震工学研究発表会講演論文集, pp101-104, 1997.

- 6) 栗田哲史, 吉田郁政, 安中正, 山本みどり : 鉛直アレイ観測記録を用いたポートアイランド表層地盤の地盤特性の同定, 第 31 回地盤工学研究発表会発表講演集, pp.1087-1088, 1996.
- 7) 安中正, 都築富雄, 増田民夫, 嶋田昌義, 岡留孝一 : 鉛直アレイ観測記録から推定した表層地盤の剛性率及び減衰定数のひずみ依存性, 第 9 回日本地震工学シンポジウム論文集, pp.493-498, 1994.
- 8) 辻原治, 沢田勉, 平尾潔, 岡本康 : 地盤の S 波速度と Q 値の同定精度に及ぼすスペクトルの平滑化の影響, 構造工学論文集, Vol.39A, pp.783-792, 1993.
- 9) KURITA,T. and MATSUI,K. : Sensitivity Analysis on Measurement noise in the Identification of Soil Properties from Vertical Array Observation Data, E.E.S.D, Vol.26,pp.951-965,1997.
- 10) 土岐憲三 : 新体系土木工学 11 構造物の耐震解析, 技報堂出版, pp.80-81, 1982.
- 11) 田島稔, 小牧和雄 : 最小二乗法の理論とその応用改訂版, 東洋書店, pp.165-180, 1996.
- 12) 沢田勉, 辻原治, 平尾潔, 山本英史 : 地盤の S 波速度と Q 値の同定問題における SLP 法の改良とその適用, 土木学会論文集, No.446/I- 19, pp.205-213, 1992.

(1998 年 9 月 18 日受付)